



走査電子顕微鏡の検出系評価と噴水型二次電子検出器の開発

著者	揚村 寿英
発行年	2018
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2017
報告番号	12102甲第8491号
URL	http://hdl.handle.net/2241/00152756

氏 名	揚村 寿英
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 8491 号
学位授与年月日	平成 30年 3月 23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審 査 研 究 科	数理解物質科学研究科
学 位 論 文 題 目	

走査電子顕微鏡の検出系評価と噴水型二次電子検出器の開発

主査	筑波大学教授（連係大学院）	理学博士	関口 隆史
副査	筑波大学教授	博士(工学)	末益 崇
副査	筑波大学教授（連係大学院）	博士(工学)	深田 直樹
副査	筑波大学準教授（連係大学院）	博士(工学)	橋本 綾子

論 文 の 要 旨

走査電子顕微鏡(SEM)は、種々の材料の表面状態をnmからmmスケールで観察するのに広く利用されている。SEM を構成する要素としては、①電子源、②電子光学系(レンズ)、③検出器(検出系)があり、それぞれの要素は、時代とともに研究が進められてきた。2000年代に入ると、低エネルギーで材料を観察することが注目され、二次電子や反射電子を対物レンズ内に引き込む、所謂インレンズ型の SEM が開発され、これに伴って、様々な検出器(検出系)の開発が行われた。しかし検出器に関しては、各 SEM 製造メーカーによってそれぞれ特徴があり、またメーカーもその詳細を積極的に開示していない。検出系の情報が開示されない状況で、複雑になっている SEM 像コントラストを説明することは困難である。

そこで本研究では、最近の SEM に適用されている三つの検出器(対物レンズ上に配置される Through-The-Lens (TTL) 検出器(In-Lens 検出器とも呼ばれる)、対物レンズ直下に配置される Under-The-Lens (UTL)検出器、試料室に配置される Chamber-ET(C-ET)検出器)の特性を、①試料から放出された全電子数のうち、何個の電子が検出器に到達するかを示す収集効率、②試料から放出された電子から、どのエネルギー、どの角度の電子が検出器に到達したかを示すアクセプタンスを導出し、作動距離(Working Distance, WD;対物レンズと試料間の距離)、加速電圧別にシミュレーションで検証した。その結果、各検出器に導かれる電子の範囲と角度が、WD によって大きく変化することが明らかになった。WD が短い場合(WD=5 mm)、二次電子の大半は対物レンズ内に取りこまれて TTL で検出され、C-ET は殆ど機能しない。反射電子は、高角度領域(鉛直上方側)はTTLで、低角度領域(水平側)はUTLで検出される。一方、WD が短い場合(WD=15 mm)、二次電子は、C-ET 側の低角度領域はC-ET で検出され、C-ET と反対側の高角度領域がTTLで検出される。UTLは中角度領域の二次電子が集まるが、固体検出器の感度が無

いために信号として検出されない。反射電子は、C-ET 側の低角度領域が C-ET で検出され、高角度領域は TTL に導かれる。また、中角度の大部分が UTL で検出される。このように、WD を変えると、各検出器で検出される二次電子、反射電子の情報が大きく変化することが明らかになった。このような状況はこれまで定性的にしか議論されてこなかったが、本研究によって検出する電子の素性が明らかになったことで、所謂 SEM 像の解釈が大きく進展することが期待される。

次に、WD に特性が依存しない検出器として、噴水型二次電子検出器を考案した。これは、負電圧をかけたグリッドで、電圧より低いエネルギーの二次電子を反射させ、試料下側に設置したマイクロチャンネルプレート(MCP)で検出するものである。試料から放出された二次電子が噴水のような軌道を取ることから噴水検出器と名付けた。研究では、この検出器の特性を向上するため、①グリッドの形状を平面から球面に変更し、②グリッドの開口率を上げ、③ロックイン検出を試みることで、信頼できる二次電子信号を得ることに成功した。これを用いて、4H-SiC の pn 接合を観察し、p 領域が n 領域より明るくなる状況をとらえ、二次電子のエネルギースペクトルとの関係を議論した。

本研究によって、走査電顕の検出系に関する理解が進み、SEM 像の物理学が進歩することが期待される。また、噴水検出器を使った SEM 像観察は、今後の種々の試料への展開が期待される。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

走査電子顕微鏡 (SEM) の分野では、近年、低エネルギーの電子ビームで材料観察を行うことが注目され、二次電子や反射電子を対物レンズ内に引き込んで検出する装置 (インレンズ SEM) が普及している。この装置は、複数の検出器を有しており、それぞれ検出する電子のエネルギーや出射方向に指向性があるものの、この情報は公開されておらず、得られた像の解釈が十分にされていない。本研究では3つの代表的な検出器を配した、仮想的なインレンズ SEM を設計し、それぞれの検出器で検出される電子のエネルギーや出射方向の範囲を明らかにした。その結果、検出される電子の特性は、検出器の配置だけでなく、作動距離に大きく依存することが明らかになった。この結果を受けて、作動距離に依存しない、エネルギーや出射角を選択できる噴水型検出器を開発し、その性能を向上させた。

検出器の特性を明らかにしたことは、SEM で得られる像を解釈するための重要な指針を与え、今後の SEM を使った研究が大きく進展する可能性がある。また、噴水検出器は、エネルギーフィルターを有した簡便な電子検出器として普及することが期待される。

以上の理由から、本論文は博士論文として十分と判断された。

〔最終試験結果〕

平成 30 年 2 月 15 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文についての説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。